

# 冰雪建筑结构的探索与发展

武岳 陈博轩 刘秀明 李清朋

(结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 黑龙江, 哈尔滨, 150090)

A.D.C. Pronk

(Section of Structural Design, Department of Built Environment, Eindhoven University of Technology)

**[摘要]** 冰雪建筑是一种以冰、雪作为主要建造材料的建筑形式,具有材料制备简易,造型美观可控的特点,在高纬度寒冷地区较为常见。自古以来,生活在北极地区的爱斯基摩人便利用冰砖砌筑堡状小屋,并将砖缝浇水冻结,作为住宅使用。近年来,随着冰雪制备、强化及施工技术的发展,冰雪建筑结构呈现高度及跨度增大,造型绚丽多样,建筑实用性高等特点,在日本、欧洲等地更是兴起了冰屋旅店、冰壳等冰雪建筑试点。哈尔滨地处西伯利亚南部的高纬平原,冬季长达4个月,气候寒冷,以冰雕、冰建筑为主的冰雪旅游已成为当地标志性产业之一。因此,开展针对冰雪材料强化、结构形态设计,及结构健康监测的研究,对促进冰雪旅游发展,带动地区经济具有十分重要的意义。

**[关键词]** 冰雪建筑、材料强化、形态设计、结构健康监测

## 一、前言

冰雪建筑是一种以冰、雪作为主要建造材料的建筑形式,可用作短期抵御风寒及造型观赏等使用,多见于气候寒冷地区,有较为悠久的发展历史。基于其材料特殊性,冰雪建筑结构具有以下特点:

### (1) 材料易得可持续

施工过程中,可利用现场周边临近的江、海等天然水源及水库等人工水源,取水简易。同时,水的储存和运输相对简单,利用罐车、输水管道等即可实现,运输成本较低。冬季结束,气温上升,临时性的冰雪建筑也将被拆除。融化成水的冰雪材料重新进入自然水循环,对环境产生的影响较小,同时实现材料的高效回收,环保可持续。

### (2) 外表绚丽美观

冰作为理想的雕塑材料,其透明的外观及较软的质地使冰建筑满足形象上的艺术性与多变性。配合彩灯及彩色染剂的后期处理,冰建筑在夜晚可塑造出晶莹剔透,美轮美奂的奇幻世界。雪同样作为雕塑材料,具有银白色外观及较低密度,适合大型雕刻艺术的塑造。同时,雪在光的照射下会产生漫反射效果,呈现出闪耀的外观,绚丽夺目。

### (3) 易于造型施工

冰雪材料质地较软,固、液态间转变难度低,在设计上可以满足更复杂的造型要求,在施工中也更容易达到外形目标。目前除传统的冰雪砌体结构施工方法,还有喷射冻结、低温浇筑等更为先进快捷的施工技术。同时,冰雪结构质量较轻,对成型模具的承载力要求也相应降低。除此之外,冰雪建筑在修改和修

补上更加容易,为结构加固与结构修复提供了有利条件。

#### (4) 材料稳定性差

冰雪是一种相对脆弱且具有明显蠕变行为的材料,其力学性质受温度影响严重,需要周密的融化保护措施。用于建筑的冰雪材料多需要一定程度的强化,同时在施工和后期使用过程中,冰雪建筑的健康监测及维护、修缮也需要投入较多的精力与资源。此外,材料稳定性较差也使得传统冰雪建筑寿命较短,在现场气温变化的影响下,冻融循环可能使建筑寿命更短。

综上所述,冰雪建筑与结构具有较好的发展前景,是新型建筑发展的一大重要课题。而目前全世界对于冰雪建筑与结构的系统研究尚属起步阶段,仅有较少的国外学者针对冰雪材料强化、冰壳结构施工方法等课题进行理论与实践尝试,尚存在较大的研究空间。目前国内在这一领域,虽东北地区有较多冰雪节等活动的举办经验,但仅停留于冰灯、冰砖砌体结构等初始阶段,系统研究十分有限。为充分推动冰雪建筑与结构的发展,本文将对以下两方面的内容进行介绍,首先对冰雪建筑及结构的历史发展沿革作以概述,随后对其当前研究情况作总结与展望。

## 二、冰雪建筑结构的发展

冰雪建筑与结构具有悠久的历史,几乎在世界各地的寒冷区域都有其独特的冰雪建筑,现以其发展沿革为路线,对世界范围内较为典型的冰雪建筑实例进行介绍。

历史最为悠久的冰雪建筑实例是著名的 Igloo,译作冰屋或雪屋,如图 1 所示。居住于加拿大北部靠近北极地区的极地因纽特人(也称爱斯基摩人)于大约 14000 年前发明了这种建筑。Igloo 采用长方体冰砖砌筑,外形类似内蒙古地区的传统住宅蒙古包,其主要优点为就地取材,抵御外界严酷风寒,作为短期或长期住宅使用。



图 1 Igloo 外观

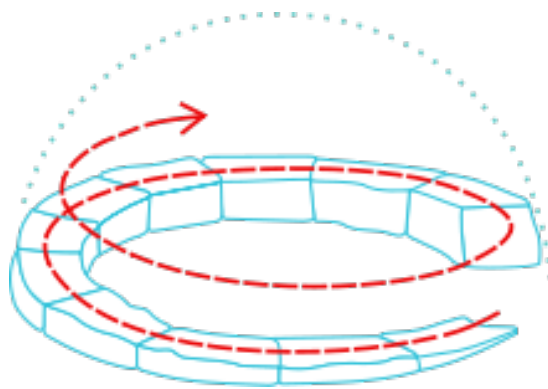


图 2 Igloo 砌筑方式

Igloo 的砌筑方式相对简单,采用冰砖旋转向上堆砌,并逐渐向中间收合的搭建方式,整体外貌呈现抛物线形,内部空间较大。搭建 Igloo 时,建造者在内部进行堆砌,以一个较小坡度旋转向上,最终顶端封口,并在地下挖一个洞口作为出入通道,如图 2 所示。建好的 Igloo 可以良好的抵御风寒,在室外温度达到 $-45^{\circ}\text{C}$ 时,其内部温度仍可保持在 $-7^{\circ}\text{C}\sim+16^{\circ}\text{C}$ 之间,满足因纽特人的生活基本需要。因内部温度较高,除了顶部预留通风口以降温和减少融化之外,内部融化的冰雪也会因外部的极低气温重新凝结,成为冰砖之间良好的凝结剂,且将冰砖间的微小缝隙填充起来,更有利于其抵御风寒。

冰雪建筑发展至今,其功能逐渐从生存手段转变为满足人们艺术欣赏的一种方式,自 1739 年俄国女皇安娜·伊万诺夫娜主持建立了历史上第一座冰雪宫殿起,世界各地用于观赏的冰雪建筑便发展起来,并逐渐演变成今天的冰雪节形式,受到人们的广泛欢迎。哈尔滨太阳岛景区自 1999 年起开始创办一年一度的冰雪博览会,至今已举办 17 届,在向世界展现北方冰城魅力的同时,更创造了巨大的经济效益。2016 举办的第 32 届冰雪节,哈尔滨共接待游客 1648.3 万人次,收入 247.8 亿元人民币,这一数字仍在逐年攀

升。2016 年的雪博会，园区建立起目前世界最高的雪塑建筑“冰雪之冠”，这一雪建筑高 51 米，占地 2800 平方米，总用雪量超过 3.5 万立方米是目前世界上最高、单体体量最大的雪塑建筑，如图 3。随着哈尔滨雪博会的国际知名度不断上升，游客对园区冰雪建筑的美观要求也在不断提高。在高度、跨度增大的同时，对于冰雪建筑的外形创新、功能创新以及施工方法改进都是迫在眉睫的问题。

除哈尔滨雪博会外，世界其他地区也有发展良好的冰雪节传统。日本北海道每年有九处地方举行雪祭，其中自 1950 年开始的札幌冰雪节是规模最大，历史最为悠久的雪祭活动，如图 4。每年来自世界各地的冰雪雕刻大师及冰雪建筑大师都会聚集于此，创造出美轮美奂的冰雪作品，并参加一年一度的雪雕大赛。同时，札幌冰雪节还举办打雪仗大赛、狂欢节等娱乐活动，充分带动地区经济发展，已经成为当地标志性产业。1972 年，冬季奥运会在札幌举办，以“欢迎来札幌”为主题的札幌冰雪节从此被全世界所熟知。



图 3 哈尔滨冰雪博览会-冰雪之冠



图 4 北海道-札幌冰雪节

由上述冰雪建筑及结构的成功实例可以看出，在寒冷地区发展冰雪建筑具有较高可行性，同时具有较高的经济价值、社会价值以及美学价值。

### 三、冰雪建筑结构研究

随着冰雪建筑与结构在世界各地逐渐发展，并逐渐成为一大新型旅游产业，对于这一建筑形式的理论研究也随之兴起。在这一领域，目前国际上研究者主要有日本学者 Tsutomu Kokawa 等，主要研究方向包含冰雪材料强化、冰雪结构施工等方面。基于现有学者的理论研究与工程实践，对相关方向研究现状介绍如下。

#### （一）冰雪材料强化

冰雪作为建筑材料，存在强度不足、气温敏感度大、力学性质不稳定三大主要问题。为合理减少上述问题对冰雪结构的影响，同时不改变冰雪材料原有优势，冰雪材料的强化对于冰雪建筑的发展起到基础性、决定性作用。

对于冰雪材料的复合强化，目前主要有宏观和微观两种方法。宏观方法即采用相对体量较大，连续的混合材料，如网、树干、土工格栅等，与水冻结形成层状复合材料，力学性能提高较为明显但在施工使用中具有一定的难度。微观方法即在水中加入粒径较小的均匀混合物如木屑、泥土等，实现材料整体力学性能及使用性能提升。目前主流的材料强化方式是微观方法，以求改变其内部结构及物理性质，抑制裂纹的形成与扩展，减缓溶解失效。

目前可应用的复合型冰材料主要有三种，分别是：Pykrete、冰-土混合物以及冰-岩土材料混合物。经过对加入玻璃屑、棉花、钢渣等 22 种混合冰材料的对比试验，最终确定这种加入木屑的冰材料在各向同性、力学性能以及加工性能等方面均表现最为突出，如图 5 所示。Pykrete 是由锯末或其他形式的木屑与水经一定比例混合后冻结形成的冰-木屑混合物，是一种目前最为热门的微观复合材料。根据试验可得，加入木屑后冰材料的物理性能有明显改变，其抗压强度，抗弯强度等指标对比纯冰都有明显提高。同时，不同粗细程度、不同比例的木屑对冰材料强度的提高程度也不同，可以发现，添加 10% 质量的木屑是最为有



效的材料加强比例,如图6所示。



图5 材料试验试块

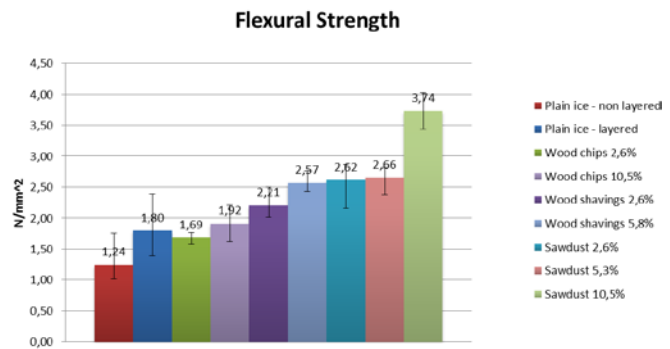


图6 Pykrete 抗弯强度对比试验结果

2014年, Arno Pronk 在芬兰利用 pykrete 材料完成了一座 30m 跨度冰穹顶建筑的设计施工。这一建筑是目前全世界跨度最大的雪屋, 同时也是木屑-冰复合材料 pykrete 在大规模实体建筑中的首次使用。根据其实验结果, 加入锯末的复合冰材料强度约达到普通冰材料的 5 倍左右。2015年, “冰雪圣家族大教堂”制作完成, 与 Pykrete 穹顶类似, 这一结构也使用了索网约束及复合冰雪喷射等技术, 但其区别在于“圣家族大教堂”的高度达到 30m, 是首个塔状冰雪建筑, 如图8所示。



图7 喷射复合冰材料后的结构



图8 冰雪圣家族大教堂

## (二) 建造技术

冰雪建筑具有较高的观赏价值与艺术价值, 这与其建造与造型技术密不可分。目前在冰雪建筑建造方面, 依照其搭建方式不同可分为砌体结构建造、冰壳结构建造两大类。

针对砌体冰雪结构, 受砌体结构自身特点限制, 现有造型方法较为单一, 难以实现对大跨度结构、高耸结构及自由曲面结构等具有连续外形结构的塑造, 具有一定的技术局限性。现阶段哈尔滨市一年一度的雪博会中, 因其施工与维护成本较低, 较为常见的仍是砌体冰雪结构。

为了克服砌体结构难以创建壳体等自由曲面结构的问题, ETH 的 P. Block 等学者对砌体薄壳的找形进行了研究, 其采用 BRG 技术, 即一种包含砌体结构分析、图形分析与设计方法研究、结构计算机找形与设计、离散单元组装以及建造与施工技术于一体的砌体结构研究方法, 对砌体薄壳进行设计建造, 并已有一定成果。下一步可应用其砌体薄壳设计施工手段对冰雪砌体薄壳进行尝试研究。

针对冰壳结构, 其主要造型技术在于冰壳找形与施工方法。根据瑞士学者 Heinz Isler 对于薄壳结构找形方法的研究, 壳体结构可以通过充气膜法、逆吊法以及流动形态法进行找形。具体到冰壳等冰雪建筑, 利用充气膜结构配合索网进行找形是相对简易可行的冰壳找形手段。Isler 指出, 充气膜结构具有气动形态, 从而便于形成兼具美学特点与纯拉受力特点的合理薄壳外形, 配合冰雪喷射等技术的使用, 易于找形和施工, 实现了冰壳跨度、高度的提升。同时, Isler 在冰壳结构方面也具有一定的研究成果, 他通过充气膜结构及张拉膜结构等方式进行冰壳找形, 建立了一系列冰穹顶结构实例, 如图9所示。

来自日本的 Tsutomu Kokawa 教授于 1980 年开始研究冰壳结构至今, 其研究主要针对冰壳结构充气膜施工方法的改进与实践。他们使用的施工方法较为单一, 主要包含三部分: 建造环装基础、建造带有索网

的充气膜结构模型、低温环境下在模型上喷射冰雪或水成型。首先在结构底部布设与地面连接的环境基础，用于锚固索网。在索网的约束下，气动形态的充气膜具有了网壳的外形，同时达到最大张力的索网也可以减少对膜结构的承载需求。经过充分膨胀，充气膜结构具有一定承载力，利用旋转式扫雪机等喷射机械，将磨碎的雪覆盖在模型上直至成型，并在-10℃气温下喷水使之冻结充分，从而撤除充气膜，完成施工，如图 10 所示。Arno Pronk 及其团队以实验研究为主，在 Kokawa 研究的基础上进行了技术结合与创新，如用铆钉直接固定索网，代替 Kokawa 充气膜施工过程中的冰环梁等，收效良好。



图 9 Isler 冰穹顶实例

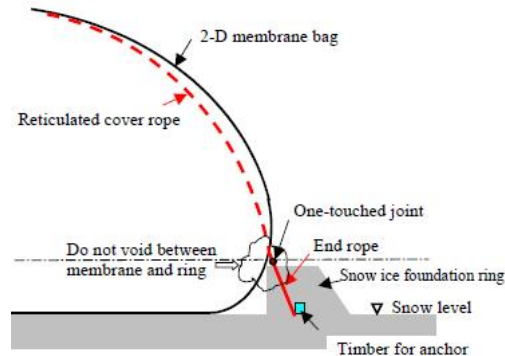


图 10 Kokawa 冰壳建造方式

### （三）相关规范

中华人民共和国住房和城乡建设部于 2011 年 8 月 29 日发布了《冰雪景观建筑技术规程》JGJ247-2011，这一规范针对冰雪材料物理化学性能、冰雪建筑设计、冰雪结构施工及配电与后期维护等方面进行了详细规定。材料性能方面，规范对分别对纯冰材料和雪材料的抗压、抗拉、抗剪及抗劈拉等强度进行了规定，为冰雪材料强度检验、冰雪结构设计计算提供了有力依据。建筑景观设计方面，规范规定了冰结构和雪结构的材料强度验算及稳定验算方式，同时包含了对于景区整体规划、水电等配套设施供应、冰雪活动项目设计、服务设施设计等周边管理内容的详细规定，涵盖范围较广。结构施工方面，规范针对冰砌体结构、雪体结构以及冰雕、冰灯等冰雪结构形式的施工方法进行了详细要求，并对工程质量验收所需检查的各工程项目进行了规定。规范针对观赏用冰雪建筑景区的规划设计与建造进行了详细规定，并提出相应合格标准，是冰雪建筑景观建设的有力依据。

这一专门规范的颁布，为我国北方地区冬季冰雪景观建筑的设计和施工提供了良好依据，极大推动了我国冰雪产业的发展，是我国冰雪建筑景观产业化的重要标志。相比之下，世界其他国家对于冰雪结构的相关国家规范则出台较少，仅芬兰层出台过针对冰雪建筑的相关规范，但这一规范仅针对纯冰材料，并不涉及符合强化冰雪材料。可见在国际范围内，冰雪建筑结构的研究仍是一个较为新兴的方向。

## 四、总结与展望

根据冰雪建筑与结构的研究现状与存在问题，对冰雪建筑未来的可研究方向作以展望与分析如下。

### 1. 材料强化

在未来冰雪材料研究过程中，应当聚焦于采用更丰富的强化手段进一步提高其性能，如配合化学合成方法、生物方法等平行学科技术手段，实现数字化配比与材料性能的精确把控，以至于达到高强混凝土等现有常用建筑材料的强化水平，从而为整个冰雪建筑方向带来巨大突破。

### 2. 造型技术

未来造型技术研究方面，应从“基础理论研究”与“施工方法改进”两方面出发。基础理论方面，在 Isler 薄壳理论的基础上，继续进行形态学层面的研究。“形”即针对结构的几何外形、索网布置方式、以及构件尺寸等外在特征，“态”即针对结构在荷载与作用下的内力分布状态，即结构的响应。所谓形态学，即是追求“形”与“态”调和，即追求结构外在特征与内在反应的协调统一。施工方法方面，应基于理论

研究成果加以改进,力求找形、施工一体化、简易化,可配合 3D 打印等先进技术,最终实现冰雪结构工业化生产的目标。

### 3. 工程可靠度研究

基于材料特殊性,冰雪结构的可靠度研究及健康监测相比其他结构形式更加重要。冰雪结构因其材料特殊性,具有严重的蠕变行为及气温敏感性,材料的力学性质随时间、温度及外力作用的改变明显。通过结构健康监测技术,除监测结构振型敏感部位的振动信号等传统指标外,针对冰雪结构特点,对其结构内部温度、冰雪融化程度、材料力学性能等专门化指标进行监测、反馈和分析,形成一体化无线传输分析系统,对冰雪结构进行全方位监测。这样才能保证冰雪结构可靠性,及时发现结构问题并加以补救,减少损失,延长冰雪结构寿命,提高其经济价值。而要实现上述健康监测目标,则包含数据采集系统、信号处理、结构分析等诸多不同领域的内容。

中国东北地区冬季气候严寒,适合发展冰雪建筑的研究工作,顺应国家文化发展趋势,开展对冰雪结构的研究工作,对地区经济转型具有重要意义。

### 参考文献

- (1) 武岳,李清朋. 逆吊实验法及其在结构形态创建中的应用[C]. 第十四届空间结构学术会议论文集.2012:500-505.
- (2) 武岳,李清朋,沈世钊等. 基于逆吊实验原理的空间结构形态数值创建方法[J].建筑结构学报,2014,35(4):41-48.
- (3) 沈世钊,武岳. 结构形态学与现代空间结构[J].建筑结构学报,2014,35(4):1-10.
- (4) 喻言. 结构健康监测的无线传感器及其网络系统[D].哈尔滨工业大学,2006.
- (5) 何浩祥,闫维明,马华等. 结构健康监测系统设计标准化评述与展望[J].地震工程与工程振动,2008,28(4):154-160.
- (6) Pronk, A.D.C., Vasiliev, N.K., Belis, J. Historical development of structural ice.
- (7) Pronk, A.D.C., Vasiliev, N.K., Janssen, F.H.M.E., Houben, R.W.G., 2014. Spraying pykrete. The spraying of water and wood fibers to reinforce ice. Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium "Shells, Membranes and Spatial Structures:Footprints", Brasilia, Brazil.
- (8) Houben, R., Shatalina, I., Pronk, A. A., vasiliev, n., & Janssen, F. (2015). A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions. Cold Regions Science and Technology, 115, 56-63. doi:10.1016/j.coldregions.2015.03.006
- (9) Pronk, A. D.C., & vasiliev, n. (2015). Ice composites as construction materials in projects of ice structures
- (10) Pronk A.D.C., Borgart A., Hijl J.M., Pluijmen R.M.F. (2014). "The calculation and construction of 30 meter span ice dome". Eindhoven, The Netherlands
- (11) Kokawa, T., Ttoh, O., Tohru, (2001). "Re-challenge to 20M span ice dome". Tokai University, Hokkaido, Japan.
- (12) Kokawa, T., Watanabe, T. (2012). "Simplified Building Techniques for Ice Shell as Temporary Structure". Tokai University, Hokkaido, Japan
- (13) Isler, H. (1986). "New shapes for shells – Eis Versuche", Construction Process of Shell Structures. Madrid, Spain.